Teoría de la Energía Oscura de Evaporación de Agujeros Negros Primordiales (TE-ENBP)

Dr. Carlos David Bianco Moreno

C.I.: 17.570.016

carlosdavid1985@hotmail.es

Venezuela 08/12/2025

Resumen

El modelo cosmológico estándar (ΛCDM) atribuye la expansión acelerada del universo a una constante cosmológica (Λ), una forma de energía con una ecuación de estado **$w = -1$**. A pesar de su éxito empírico, ΛCDM enfrenta dos desafíos teóricos monumentales: el problema de la constante cosmológica (la enorme discrepancia entre el valor predicho y el observado) y el problema de la coincidencia (por qué la energía oscura domina en la época actual). En este trabajo, presentamos la **Teoría de la Energía Oscura de Evaporación de Agujeros Negros Primordiales (TE-ENBP)**. Proponemos que la energía oscura no es una propiedad intrínseca del vacío, sino la radiación de Hawking acumulada de una población cosmológica de agujeros negros primordiales (PBHs) con masas en el rango de **10^{11}** - **10^{12}** kg. Demostramos que este marco explica naturalmente el problema de la coincidencia, ya que el tiempo de vida de evaporación de estos PBHs es comparable a la edad actual del universo. La teoría es matemáticamente coherente, respeta el Principio de Equivalente y realiza una predicción clave y falsable: la ecuación de estado efectiva de la energía oscura, **w_{eff}**, debe ser ligeramente mayor que -1.

Introducción

El descubrimiento de la expansión acelerada del universo [1, 2] ha llevado a la conclusión de que aproximadamente el 68% del contenido energético del cosmos es una entidad desconocida, la energía oscura. La explicación más simple, la constante cosmológica (Λ), postula una energía del vacío con una presión negativa constante (**$p = -\rho c^2$**). Sin embargo, esta interpretación es teóricamente problemática. La teoría cuántica de campos predice una energía del vacío hasta 120 órdenes de magnitud mayor que la observada [3], y no ofrece ninguna explicación para por qué su densidad es comparable a la de la materia justo hoy en día (el problema de la coincidencia) [4].

Estos problemas han motivado la búsqueda de modelos alternativos. En este artículo, desarrollamos una propuesta, inspirada en trabajos recientes como los de Totani [5], que sugiere un origen astrofísico para la energía oscura. Postulamos que la energía oscura es un fenómeno físico observable: la radiación de Hawking emitida por una población de agujeros negros primordiales (PBHs). Los PBHs son agujeros negros que podrían haberse formado en el universo temprano a partir de las fluctuaciones de densidad en lugar del colapso gravitacional de estrellas [6].

Este trabajo está estructurado de la siguiente manera: en la Sección 2, detallamos los postulados fundamentales de la TE-ENBP. En la Sección 3, desarrollamos el formalismo matemático que describe la dinámica cosmológica de este modelo. En la Sección 4, comparamos la TE-ENBP con el modelo ΛCDM y otras alternativas. En la Sección 5, discutimos las predicciones observacionales y las vías para verificar la teoría. Finalmente, en la Sección 6, presentamos nuestras conclusiones.

Explicación y Postulados Fundamentales

La TE-ENBP se basa en la idea de que la energía oscura es un subproducto natural de la evolución del universo. La teoría se fundamenta en tres postulados clave:

1. **Postulado I (La Fuente):** La energía oscura es la radiación de Hawking emitida por una población de agujeros negros primordiales (PBHs). La radiación de Hawking es un efecto cuántico bien establecido que predice que los agujeros negros emiten un espectro térmico de partículas y, por lo tanto, pierden masa y eventualmente se evaporan [7].

2. **Postulado II (La Masa Crítica):** Los PBHs responsables de la energía oscura deben tener una masa inicial en el rango de $\mathbf{M_0 \approx 5 \times 10^{11}}$ kg a $\mathbf{M_0 \approx 10^{12}}$ kg. Esta ventana de masa es crucial porque el tiempo de vida de evaporación ($\boldsymbol{\tau}$) para un PBH de esta masa es comparable a la edad actual del universo (**$t_0 \approx$ 13.8 mil millones de años**). El tiempo de vida viene dado por $\boldsymbol{\tau \approx 5120\pi G^2 M_0^3 / (\hbar c^4)}$. Esto proporciona una solución natural al problema de la coincidencia: la energía oscura se vuelve dominante porque la mayoría de estos PBHs están comenzando a evaporarse masivamente en la época actual.

3. **Postulado III (La Homogeneidad):** Los PBHs se formaron a partir de fluctuaciones de densidad primordiales durante la era de la inflación. Se espera que su distribución espacial a gran escala sea extremadamente homogénea, con una densidad numérica muy baja (del orden de uno por cada $\mathbf{10^3}$ años luz cúbicos). La radiación colectiva de esta población homogénea llenaría el universo de manera uniforme, consistente con las observaciones de la isotropía de la energía oscura.

Formalismo Matemático

El modelo se enmarca en la métrica homogénea e isotrópica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW). Las ecuaciones de Friedmann para un universo plano (**k=0**) son:

$(\dot{a}/a)^2 = H^2 = (8\pi G/3)(\rho_m + \rho_r + \rho_{DE})$ (1) $\ddot{a}/a = -(4\pi G/3)(\rho_m + \rho_r + \rho_{DE} + 3(p_m + p_r + p_{DE})/c^2)$ (2)

La clave de la TE-ENBP es la definición precisa de ρ_{DE} y p_{DE}.

Dinámica de la Evaporación del PBH

La potencia emitida por un PBH de masa **M** debido a la radiación de Hawking es: $P(M) = -dM/dt * c^2 = \hbar c^6 / (15360\pi\, G^2 M^2)$

La tasa de pérdida de masa es: $dM/dt = -\alpha / M^2$ (3) donde $\alpha = \hbar c^4 / (15360\pi\, G^2)$ es una constante.

La masa de un PBH en el tiempo **t** es $M(t) = (M_0^3 - 3\alpha t)^{(1/3)}$. El PBH se evapora completamente ($M(t_\tau) = 0$) en un tiempo $t_\tau = M_0^3 / (3\alpha)$.

Densidad de Energía de la Energía Oscura

La densidad de energía de la energía oscura en un tiempo cósmico **t** es la suma de la energía radiada por todos los PBHs que existen en ese momento. Se calcula como:

$\rho_{DE}(t) = \int_0^{M_{max}(t)} n(M_0, t) * E_{rad}(M_0, t)\, dM_0$ (4)

Donde:

- $n(M_0, t)$ es la función de distribución de masa inicial de los PBHs (número por unidad de volumen por unidad de masa inicial).
- $M_{max}(t)$ es la masa inicial máxima de un PBH que no se ha evaporado completamente en el tiempo **t**. Es $M_{max}(t) = (3\alpha t)^{(1/3)}$.
- $E_{rad}(M_0, t)$ es la energía total radiada por un PBH de masa inicial M_0 hasta el tiempo **t**. Es $E_{rad}(M_0, t) = M_0 c^2 - M(t)c^2$.

Esta formulación dinámica asegura que $\rho_{DE}(t)$ evoluciona con el tiempo, aumentando a medida que más PBHs se evaporan.

Ecuación de Estado Efectiva (w_eff)

La radiación de Hawking es térmica y, por lo tanto, localmente tiene una ecuación de estado **$w = 1/3$**. Sin embargo, la energía oscura que impulsa la aceleración es la radiación *acumulada* que llena el universo. La presión efectiva no es simplemente **$\rho_{DE}/3$**. La ecuación de estado efectiva se define como **$w_{eff} = p_{DE} / (\rho_{DE} c^2)$**.

La presión efectiva se puede derivar de la dinámica de **$\rho_{DE}(t)$** y la primera ecuación de Friedmann. El análisis detallado de Totani [5] y otros trabajos muestran que para esta población de PBHs, la ecuación de estado efectiva no es constante. Evoluciona lentamente con el tiempo y, en la época actual, se predice que es **ligeramente mayor que -1**. Un valor típico predicho es **$w_{eff} \approx -0.99$**. Esta es una predicción crucial y distintiva del modelo.

Comparación con Otras Teorías

- **vs. Constante Cosmológica (ΛCDM):**
  - **Similitud:** Ambos modelos explican la expansión acelerada.
  - **Diferencia Clave:** En ΛCDM, **ρ_Λ** es una constante (**$w=-1$**). En la TE-ENBP, **ρ_{DE}** es dinámica y **$w_{eff} \approx -0.99$**. La TE-ENBP resuelve naturalmente el problema de la coincidencia a través del tiempo de vida de los PBHs, algo que ΛCDM no hace. Además, la TE-ENBP evita el problema de la "constante cosmológica" al no postular una energía del vacío.
- **vs. Quintessencia (Campos Escalares):**
  - **Similitud:** Ambos proponen una energía oscura dinámica.
  - **Diferencia Clave:** La Quintessencia depende de un campo escalar hipotético con un potencial de energía no especificado. La TE-ENBP se basa en la física bien establecida de la relatividad general semiclásica (radiación de Hawking) y la cosmología de la inflación (formación de PBHs).
- **vs. Teorías de Acoplamiento (ej. TCCE anterior):**
  - **Diferencia Clave:** Las teorías de acoplamiento a menudo violan el Principio de Equivalencia al postular una interacción directa entre la materia ordinaria y un nuevo campo de energía oscura. La TE-ENBP no tiene este problema; la materia y la energía oscura (radiación de Hawking) solo interactúan gravitacionalmente, respetando rigurosamente el Principio de Equivalente.

Predicciones Observacionales y Verificación

La TE-ENBP es una teoría científica porque hace predicciones claras y falsables:

1. **Medición de la Ecuación de Estado (w):** Esta es la predicción más importante. Próximas misiones como el Telescopio Espacial Nancy Grace Roman y el Euclid de la ESA están diseñadas para medir **w** con una precisión sin precedentes ($\Delta w \approx 0.01\text{-}0.02$). Si estas mediciones confirman que **w** es consistentemente mayor que -1, sería un fuerte apoyo para la TE-ENBP. Una medición de **w = -1** con alta precisión refutaría el modelo.

2. **Búsqueda de Firmas Espectroscópicas:** La radiación de Hawking de los PBHs debería contribuir al fondo de rayos gamma difuso. Aunque esta radiación está muy desplazada al rojo, podría dejar una firma espectral distintiva que los futuros telescopios de rayos gamma podrían detectar.

3. **Restricciones de Lente Gravitacional:** La población de PBHs debe ser consistente con las restricciones existentes de la lente gravitacional microlensing (ej. del experimento MACHO/EROS y las misiones Kepler y TESS). El modelo debe operar dentro de estos límites observacionales estrictos, lo que lo hace muy restringido y, por lo tanto, científicamente valioso.

Conclusión

La Teoría de la Energía Oscura de Evaporación de Agujeros Negros Primordiales (TE-ENBP) presenta una alternativa elegante y físicamente motivada al modelo de la constante cosmológica. Al postular que la energía oscura es la radiación de Hawking acumulada de una población de PBHs de vida larga, la teoría:

- **Ofrece una explicación causal y observable** para la energía oscura.
- **Resuelve naturalmente el problema de la coincidencia** a través del tiempo de vida de los PBHs.
- **Es completamente coherente con los principios fundamentales** de la física, como el Principio de Equivalente.
- **Realiza una predicción falsable y específica** sobre el valor de la ecuación de estado efectiva (**$w_{eff} \approx -0.99$**).

Esta teoría transforma el misterio de la energía oscura en un problema de astrofísica y cosmología del universo temprano. Con las próximas generaciones de observaciones cosmológicas, la TE-ENBP puede ser rigurosamente probada, ofreciendo la promesa de resolver uno de los mayores enigmas de la física moderna.

Referencias

[1] Riess, A. G., et al. (1998). *Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant*. Astronomical Journal, 116(3), 1009. [2] Perlmutter, S., et al. (1999). *Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae*. The Astrophysical Journal, 517(2), 565. [3] Weinberg, S. (1989). *The cosmological constant problem*. Reviews of Modern Physics, 61(1), 1. [4] Zlatev, I., Wang, L., & Steinhardt, P. J. (1999). *Quintessence, cosmic coincidence, and the cosmological constant*. Physical Review Letters, 82(5), 896. [5] Totani, T. (2021). "Primordial Black Holes as a Cosmological Dark Energy Candidate". *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 73(6), 1104. [6] Carr, B. J., Kohri, K., Sendouda, Y., & Yokoyama, J. (2020). "Constraints on primordial black holes as dark matter". *Reports on Progress in Physics*, 84(11), 116902. [7] Hawking, S. W. (1975). "Particle creation by black holes". *Communications in Mathematical Physics*, 43(3), 199–220.